

Solubilité du carbone et relaxation des contraintes dans des films de $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$ préparés par implantation ionique et recristallisation par laser à excimères

A. Grob, J.J. Grob, D. Muller, B. Prévot et E. Fogarassy

Laboratoire PHASE-CNRS (UPR 292), BP. 20, 67037 Strasbourg cedex 2, France

Résumé : Des films d'alliages semiconducteurs de la colonne IV sont élaborés par recuit laser à excimères de Si implanté avec des ions Ge et C. Grâce au phénomène de fusion-solidification rapide induit par l'impulsion laser "nanoseconde", on incorpore des concentrations très élevées de C (~1%) en sites substitutionnels dans l'alliage ternaire, susceptibles de compenser les contraintes induites dans Si par les atomes de Ge.

L'incorporation de quelques % d'un élément à rayon de covalence faible, comme le carbone, dans des films épitaxiés de $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0.10 < x < 0.20$) sur substrat Si est censée compenser l'expansion tétragonale du réseau du silicium résultant de l'introduction de germanium. Toutefois, à la différence de Ge soluble en toutes proportions dans Si, la solubilité limite de C dans Si, à l'équilibre thermodynamique, est très faible (qq. 10^{-4} %). Des études récentes [1,2] ont montré la possibilité d'accroître considérablement la solubilité du carbone par recuit laser à excimères de Si implanté avec des ions C. Lors de la solidification rapide de la zone fondue par l'impulsion laser "nanoseconde", les atomes de carbone sont "piégés" à l'interface liquide-solide en sites substitutionnels dans le réseau du silicium à des concentrations de l'ordre du %, susceptible de compenser les contraintes induites dans Si par Ge [3].

Des couches amorphes de $\text{Si}_{1-y}\text{C}_y$ et $\text{Si}_{1-x-y}\text{Ge}_x\text{C}_y$, d'environ 150 nm d'épaisseur, ont été préparées par implantation ionique de Ge et(ou) de C dans des échantillons $\text{Si} < 100 >$. Les conditions d'implantation ont été choisies de manière à obtenir des concentrations uniformes de germanium ($x \sim 0.12$) et de carbone ($y \sim 0.0066, 0.011$ et 0.033) dans les zones implantées.

Les recuits ont été effectués, à l'air, au moyen d'un laser à excimère KrF ($\lambda=248\text{nm}$). La densité d'énergie par impulsion ($\sim 20\text{ns}$) est de l'ordre de 1 J/cm^2 , afin de réaliser la fusion complète de la zone amorphisée par l'implantation ionique qui pourra cristalliser à partir du substrat monocristallin sous-jacent.

Les spectres de rétrodiffusion de particules chargées (RBS) et de canalisation des fig.1a et 1b montrent l'influence de la concentration en carbone implanté sur la qualité cristalline de la surface traitée au laser. Pour 1.1% de C (fig.1a), les films sont presque parfaitement recristallisés avec un rendement minimum $\chi_m \approx 0.06$, alors que pour 3.3% de C (fig.1b), on observe l'existence de défauts résiduels, responsable d'une augmentation significative de la valeur du χ_m .

Les mesures de spectroscopie infra-rouge (FTIR) et de Raman permettent d'étudier la localisation du carbone dans le réseau du silicium. La raie à 607 cm^{-1} , observée sur les spectres FTIR de la fig.2, correspond au mode local de vibration du C substitutionnel. Il est aussi intéressant de noter que pour une concentration en carbone de 3.3%, le signal FTIR montre clairement l'existence d'une bande d'absorption autour de 800 cm^{-1} , caractéristique de la formation de précipités de SiC dans la zone recristallisée par le laser. De ces résultats, on peut conclure que la solubilité limite du carbone dans le silicium, par épitaxie laser en phase liquide, est de l'ordre de 1%.

La technique du balayage angulaire autour d'un axe de canalisation en incidence oblique (l'axe $<111>$ dans nos expériences) est particulièrement bien adaptée à la mesure des contraintes de réseau et de leur relaxation. Celles-ci se traduisent par l'observation d'un décalage ($\Delta\Psi$) entre les minima des enregistrements issus, respectivement du film contraint (en compression (+) ou en extension (-)) et du substrat de Si sous-jacent. Ces expériences ont été effectuées sur trois types d'échantillons contenant des concentrations définies en Ge et en C (fig. 3). L'incorporation de Ge dans Si produit

une contrainte de compression ($\Delta\Psi = + 0.22^\circ$). A l'inverse, les atomes de C, dont le rayon de covalence est plus petit que celui du Si, produisent une contrainte de tension ($\Delta\Psi = - 0.13^\circ$). Enfin, dans l'alliage ternaire, on observe une compensation partielle de la contrainte dans le film SiGe par C ($\Delta\Psi = + 0.12^\circ$)

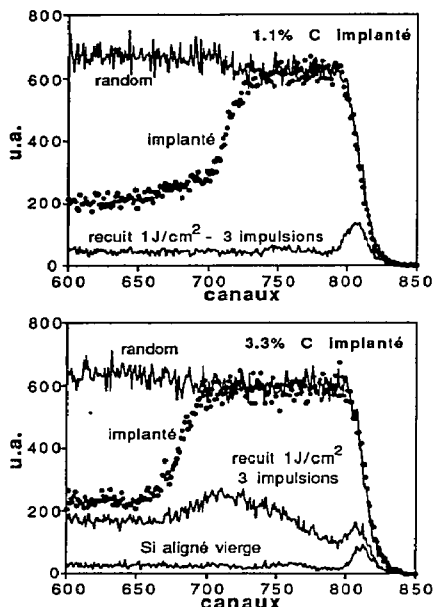


Fig 1a et 1b : Analyse RBS en random et aligné <100> d'échantillons contenant 1.1% (en haut) et 3.3% (en bas) de C et recuit à $1 \text{ J/cm}^2 - 3$ impulsions

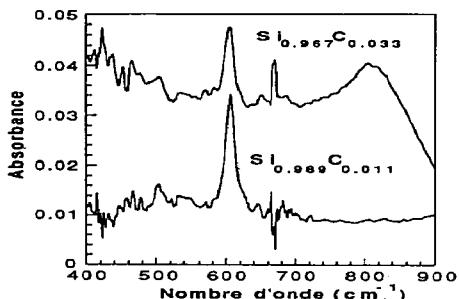


Fig 2 : Absorption IR sur des échantillons contenant 1.1% et 3.3% de C

Références

[1] Fogarassy E., Dentel D., Grob J.J., Prévot B. Stoquert J.P. et Stuck R. MRS Symp. Proc. Vol.354 (1995) 585-590.
 [2] Kántor Z., Fogarassy E., Grob A., Grob J.J., Muller D., Prévot B. et Stuck R. Appl. Phys.Lett. 69 (1996) 969-971.
 [3] Grob A., Grob J.J., Muller D., Prévot B., Stuck R. et Fogarassy E. Présenté à la Conférence E-MRS, Symp. D (Strasbourg, 1996).

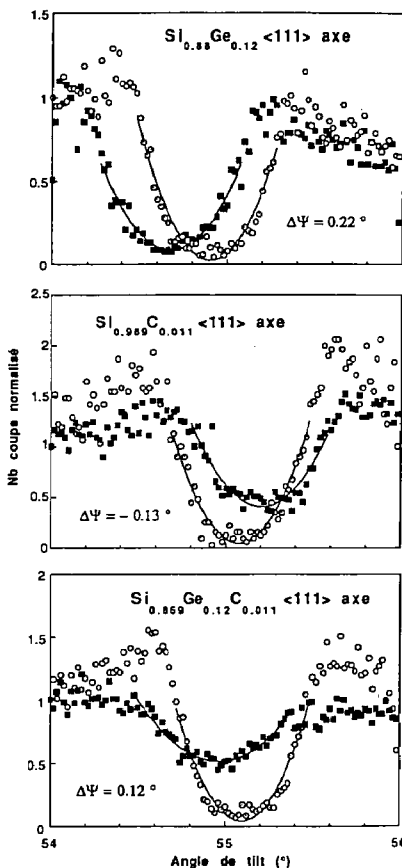


Fig 3 : Canalisation autour de l'axe <111>. (■) correspond à un balayage angulaire dans la couche traitée et (○) dans le substrat.